

# 基于事件触发观测器的不对中故障检测

石怀涛,袁振明,侯马骁,赵金宝

(沈阳建筑大学机械工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 研究利用离散时间观测器模型来检测转子系统的早期不对中故障,提出一种基于新型事件触发区间观测器的转子早期不对中故障检测方法。方法 由区间观测器生成残差区间,过程中引入更符合实际的  $l_1/H_\infty$  性能指标并转化为线性矩阵不等式约束条件下的凸优化问题;利用转子不对中实验平台进行实验,验证所提故障检测方法的有效性。结果 新型事件触发区间观测器具有最优的未知干扰鲁棒性和早期不对中故障敏感度;分析实验振动数据表明,引入事件触发策略后数据量减少一半。结论 笔者提出的事件触发区间观测器故障检测方法有更广泛的应用范围,引入事件触发机制,在保证检测效果的前提下,缓解了通信网络的压力。

**关键词** 转子系统;不对中故障;区间观测器;事件触发;线性矩阵不等式

中图分类号 TH165<sup>+</sup>.3

文献标志码 A

## Misalignment Fault Detection Based on Event-Triggered Observer

SHI Huaitao, YUAN Zhenming, HOU Maxiao, ZHAO Jinbao

(School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** The study is to investigate the discrete-time observer model for early fault detection in rotor systems and propose a new method for detecting early faults in rotors based on a novel event-triggered interval observer. The method generates residual intervals using the interval observer and introduces performance metrics that are more practical, transforming them into a convex optimization problem with linear matrix inequality constraints. The results show that the new event-triggered interval observer has optimal robustness against unknown disturbances and sensitivity to early faults. Experimental tests were conducted on a rotor imbalance platform, where vibration data was extracted and analyzed. It was found that the introduction of the event-triggering strategy reduced the amount of data by half. The proposed event-triggered interval observer-based fault detection method has a broader range of applications. By introducing the event-triggering

收稿日期:2021-08-12

基金项目:国家自然科学基金项目(52075348);辽宁省自然科学基金项目(2019-ZD-0654);辽宁省教育厅项目(lnfw202007);东北大学航空动力装备振动及控制教育部重点实验室研究基金项目(VCAME202001);辽宁省兴辽英才青年拔尖人才项目(XLYC2007031)

作者简介:石怀涛(1982—),男,教授,博士,主要从事系统故障诊断等方面研究。

mechanism, it alleviates the pressure on the communication network while ensuring the effectiveness of fault detection.

**Key words:** rotor system; misalignment; interval observer; event-triggered; linear matrix inequality

转子传动系统犹如“大动脉”,承担动力和运动传输,长期运行,精度下降,故障频发<sup>[1-3]</sup>。张宏献等<sup>[4]</sup>指出转子不对中故障在初始阶段容易发生。转子不对中故障是指本应同轴的转子,实际运行中轴心线出现偏移。轴心线的偏移会引起整机振动磨损,影响正常运行。由于转子早期不对中故障相比于突发故障具有演化速率较慢、振幅较低等特点。这些特点使得转子早期不对中故障检测困难重重,基于模型解析的方法相比于数据驱动的方法对转子系统内部结构有更深层的认识,因此用于转子早期不对中故障检测效果显著,并且具有很好的实时性。基于模型解析方法的关键是残差的产生和阈值设定<sup>[5]</sup>。

作为有效的残差生成器,Luenberger 观测器引起了研究者的关注<sup>[6-8]</sup>。石怀涛等<sup>[9]</sup>基于 Luenberger 观测器设计了不稳定的离散时间切换系统的状态估计,但其只考虑了单目标优化。A. Chibani 等<sup>[10]</sup>对模糊系统进行了有限频域的  $H_{\infty}/H_2$  故障检测观测器进行设计,通过多目标优化使得观测器产生的残差具有更好的干扰鲁棒性以及故障敏感度。然而,阈值的设计在实际系统中仍然是一个难点。区间观测器相比于传统观测器故障检测方法省去了残差评价器和阈值选择器两个设计步骤,为转子早期不对中故障检测提供了新思路。F. Mazenc 等<sup>[11]</sup>针对线性系统,基于 Luenberger 观测器设计出了区间观测器。S. Chebotarev 等<sup>[12]</sup>针对线性时变系统设计出区间观测器,并引入  $H_{\infty}/H_2$  性能指标用于增加干扰鲁棒性以及故障敏感度。随着区间观测器技术的不断发展,研究者开始致力于研究将区间观测器用于复杂系统中的故障检测。C. Zammali 等<sup>[13]</sup>使用区间观测器来检测一类具有传感器故障的离散时间切

换系统。Q. Y. Su 等<sup>[14]</sup>针对所有子系统不稳定的切换系统,提出了一种基于区间观测器的故障检测与隔离方法。Z. H. Zhang 等<sup>[15]</sup>给出了多智能体系统的故障检测与隔离区间观测器的设计。虽然区间观测器在早期故障诊断领域受到了越来越多的重视,但是鲜有将其应用到实际转子系统早期不对中故障检测中,主要是因为区间观测器的设计约束较多,在转子系统中很容易出现无解情况,转子系统当中未知干扰会覆盖早期不对中故障信号,导致检测结果不精确。

相比于上述 Luenberger 区间观测器,新型事件触发区间观测器拥有更多设计自由度,可以增加区间观测器的应用范围,即区间观测器在更多实际转子系统中增益有解。针对未知干扰影响早期不对中故障检测精度问题,引入干扰鲁棒性以及不对中故障敏感度性能指标,现有研究多是在基于区间观测器早期故障诊断方法中引入  $H_{\infty}/H_2$  性能指标<sup>[16]</sup>,来提高干扰鲁棒性以及故障敏感度。其中,基于  $H_{\infty}$  性能指标的干扰鲁棒性条件,要求未知干扰满足  $l_2$  范数有界。然而,转子系统中的未知干扰通常是幅值有界而不是能量有界,很难根据范数理论得到较为准确的阈值。

综上所述,在区间观测器故障检测方法的基础上,笔者设计一种新型事件触发区间观测器故障检测方法,并引入  $l_1/H_{\infty}$  性能指标来提高干扰鲁棒性和故障敏感度,并利用转子不对中实验平台,验证所提基于新型事件触发区间观测器转子不对中故障检测方法的有效性。研究表明:笔者提出的事件触发区观测器故障检测方法应用范围更广,能够缓解通信网络的压力。

1 转子系统不对中系统描述

转子不对中示意图如图1所示。该模型不考虑机匣和轴承座的振动,对故障模型进行简化分析。

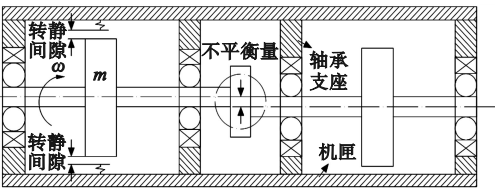


图1 转子不对中示意图

Fig.1 Schematic diagram of the rotor misalignment

根据牛顿第二定律,转子系统不对中微分方程:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = me\omega^2 \cos\omega t + P_x + F_{xc}; \\ m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = me\omega^2 \sin\omega t + P_y + F_{yc} - mg. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $m$ 为联轴器质量; $c$ 为转子在轴承处的阻尼系数; $k$ 为弹性轴的刚度; $e$ 为质量偏心; $\omega$ 为转速; $P_x$ 和 $P_y$ 分别为圆盘处 $x$ 方向和 $y$ 方向的碰摩力; $F_{xc}$ 和 $F_{yc}$ 分别为转子在 $x$ 方向和 $y$ 方向收到的激振力; $g$ 为重力加速度。

方程(1)转化为如下状态方程:

$$\begin{cases} \dot{Z} = \hat{A}Z + \hat{D}d + \hat{F}f + A; \\ y = \hat{C}Z. \end{cases} \quad (2)$$

其中,

$$Z = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ y \\ \dot{y} \end{bmatrix}, \hat{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix},$$

$d$ 为未知干扰项; $f$ 为不对中故障信号; $A$ 为

$$\hat{\epsilon}(k) = \begin{bmatrix} 2Y(k)(\Psi A - \bar{L}C)\varphi + \bar{L}E_n - ((\Psi A - \bar{L}C)\varphi + \bar{L})\epsilon(k) \\ 2Y(k)(\Psi A - \bar{L}C)\varphi + \bar{L}E_n + ((\Psi A - \bar{L}C)\varphi + \bar{L})\epsilon(k) \\ \epsilon(k) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

其中, $\epsilon(k) = \hat{y}(k) - y(k)$ , $\hat{y}(k) = y(k_i)$ , $k \in [k_i, k_{i+1}]$ ;  $\Psi, \varphi, \bar{L}, \underline{L}$  分别为之后定义的区间观测器增益参数矩阵。 $k_i$ 为第 $i$ 个事件

常数项; $y(k)$ 为传感器输出信号;

$$\hat{C} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

在实际当中,传感器采集数据通常为周期采样。因此,通过零阶保持器可得到离散时间转子系统。

$$\begin{cases} Z(k+1) = AZ(k) + Dd(k) + Ff(k) + A; \\ y(k) = CZ(k). \end{cases} \quad (3)$$

其中,矩阵 $A, D, F, C$ 是由矩阵 $\hat{A}, \hat{D}, \hat{F}, \hat{C}$ 通过零阶保持器得到的。

假设:未知干扰 $d(k)$ 存在如下边界条件。

$$\underline{d} \leq d(k) \leq \bar{d}. \quad (4)$$

引理1:根据假设1,如下不等式成立。

$$D^+ \underline{d} - D^- \bar{d} \leq Dd(k) \leq D^+ \bar{d} - D^- \underline{d}. \quad (5)$$

2 转子不对中早期故障检测方法

2.1 事件触发策略

为了降低转子不对中故障检测过程中通信网络带宽的占有率,提出以下事件触发策略。传感器输出信号在满足特定条件下才可以将测量的输出信号传输到故障检测区间观测器中。

$$\zeta y^T(k)y(k) - \eta \hat{\epsilon}^T(k)\hat{\epsilon}(k) > 0. \quad (6)$$

其中, $\zeta > 0$ 和 $\eta > 0$ 为事件触发参数; $y(k)$ 为输出信号。

引理2:在假设条件下,无故障发生时给出的转子系统式(3)输出是有界的。

根据引理1,得到:

实例,且 $k_{i+1} > k_i$ ;  $\epsilon(k)$ 为事件误差。仅当不等式(6)成立时,才能将传感器测量的输出信号传输到区间观测器,否则不能传输。因

此,事件触发策略可以有效地减少通信次数降低通信网络压力。

## 2.2 不对中故障检测事件触发区间观测器设计策略

若将现有的 Luenberger 区间观测器应用到转子系统式(3)中,误差系统非负条件无法满足,增益参数无解。

因此,根据转子系统式(3),设计应用更加广泛的新型不对中故障检测事件触发区间观测器。

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{\xi}(k+1) = \Psi A \bar{Z}(k) + \underline{L}(\hat{y}(k) - C \bar{Z}(k)) - 2Y(k) \parallel (\Psi A - \underline{L}C) \varphi + \underline{L} \parallel E_n + \underline{\Delta}; \\ \bar{Z}(k) = \underline{\xi}(k) + \varphi \hat{y}(k); \\ \underline{Z}(k) = \bar{Z}(k) - 2Y(k) \parallel \varphi \parallel E_n; \\ \underline{y}(k) = C^+ \underline{\xi}(k) - C^- \bar{\xi}(k); \\ \underline{r}(k) = V(\Psi \hat{y}(k) - \bar{y}(k)); \\ \bar{\xi}(k+1) = \Psi A \hat{Z}(k) + \bar{L}(\hat{y}(k) - C \hat{Z}(k)) + 2Y(k) \parallel (\Psi A - \bar{L}C) \varphi + \bar{L} \parallel E_n + \bar{\Delta}; \\ \hat{Z}(k) = \bar{\xi}(k) + \varphi \hat{y}(k); \\ \bar{Z}(k) = \hat{Z}(k) + 2Y(k) \parallel \varphi \parallel E_n; \\ \bar{y}(k) = C^+ \bar{\xi}(k) - C^- \underline{\xi}(k); \\ \bar{r}(k) = V(\Psi \hat{y}(k) - \underline{y}(k)); \\ \Psi + \varphi C = I. \end{array} \right. \quad (8)$$

$$\underline{\Delta} = (\Psi D)^+ \underline{d} - (\Psi D)^- \bar{d}. \quad (9)$$

$$\bar{\Delta} = (\Psi D)^+ \bar{d} - (\Psi D)^- \underline{d}. \quad (10)$$

式中:  $\underline{Z}(k)$  和  $\bar{Z}(k)$  分别为状态  $Z(k)$  估计的下界和上界;  $\underline{\xi}(k)$ ,  $\bar{Z}(k)$ ,  $\underline{y}(k)$ ,  $\bar{\xi}(k)$ ,  $\hat{Z}(k)$ ,  $\bar{y}(k)$  为中间变量;  $\Psi$ ,  $\varphi$ ,  $\underline{L}$ ,  $\bar{L}$  为区间观测器式(7)的增益参数;  $\underline{r}(k)$  和  $\bar{r}(k)$  分别为残差的下界与上界。

利用未知矩阵  $\Gamma$  表示增益参数  $\Psi$  和  $\varphi$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi = H^T X_1 + \Gamma(I - HH^T) X_1; \\ \varphi = H^T X_2 + \Gamma(I - HH^T) X_2. \end{array} \right. \quad (11)$$

$$\text{其中, } H = \begin{bmatrix} I \\ C \end{bmatrix}, X_1 = \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}, X_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}.$$

定义关于转子系统的  $\underline{e}_\xi(k)$  和  $\bar{e}_\xi(k)$ :

$$\underline{e}_\xi(k) = \Psi Z(k) - \underline{\xi}(k). \quad (12)$$

$$\bar{e}_\xi(k) = \bar{\xi}(k) - \Psi Z(k). \quad (13)$$

根据转子系统式(3)和不对中故障检测区间观测器式(8),将式(12)和式(13)转化为

$$\begin{aligned} \underline{e}_\xi(k+1) &= \Psi Z(k+1) - \underline{\xi}(k+1) = \\ &= (\Psi A - \underline{L}_0^0 C)(Z(k) - \bar{Z}(k)) + \Psi D d(k) - \\ &= \underline{L} \varepsilon(k) + 2Y(k) \parallel (\Psi A - \underline{L}C) \varphi + \underline{L} \parallel E_n - \\ &= (\Psi D)^+ \underline{d}(k) + (\Psi D)^- \bar{d}(k) + \Psi F f(k). \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \bar{e}_\xi(k+1) &= \bar{\xi}(k+1) - \Psi Z(k+1) = \\ &= (\Psi A - \bar{L}C)(\hat{Z}(k) - Z(k)) - \Psi D d(k) + \\ &= \bar{L} \varepsilon(k) + 2Y(k) \parallel (\Psi A - \bar{L}C) \varphi + \parallel E_n + \\ &= (\Psi D)^+ \bar{d} - (\Psi D)^- \underline{d} - \Psi F f(k). \end{aligned} \quad (15)$$

根据不对中故障检测区间观测器式(8),  $\underline{e}_\xi(k)$ ,  $\bar{e}_\xi(k)$  和  $\underline{e}_z(k)$ ,  $\bar{e}_z(k)$  之间的关系如下:

$$\underline{e}_z(k) = Z(k) - \bar{Z}(k) = Z(k) - \underline{\xi}(k) - \varphi \hat{y}(k) = \underline{e}_\xi(k) - \varphi \varepsilon(k). \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \bar{e}_z(k) &= \hat{Z}(k) - Z(k) = \bar{\xi}(k) + \varphi \hat{y}(k) - \\ &= Z(k) = \bar{e}_\xi(k) + \varphi \varepsilon(k). \end{aligned} \quad (17)$$

将式(16)和式(17)带入到式(14)和式(15)得到如下等式:

$$\begin{aligned} \underline{e}_\xi(k+1) &= \Psi Z(k+1) - \underline{Z}(k+1) = (\Psi A - \\ &= \underline{L}C) \underline{e}_\xi(k) - ((\Psi A - \underline{L}C) \varphi + \underline{L}) \varepsilon(k) + \\ &= \Psi D d(k) - (\Psi D)^+ \underline{d}(k) + (\Psi D)^- \bar{d}(k) + \\ &= 2Y_\theta \parallel (\Psi A - \underline{L}C) \varphi + \underline{L} \parallel E_n + \Psi_0^0 F f(k). \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \bar{e}_\xi(k+1) &= \bar{\xi}(k+1) - \Psi Z(k+1) = \\ &= (\Psi A - \bar{L}C) \bar{e}_\xi(k) + ((\Psi A - \bar{L}C) \varphi + \bar{L}) \varepsilon(k) + \\ &= (\Psi D)^+ \bar{d}(k) - (\Psi D)^- \underline{d}(k) - \Psi D d(k) + \\ &= 2Y \parallel (\Psi A - \bar{L}C) \varphi + \bar{L} \parallel E_n - \Psi F f(k). \end{aligned} \quad (19)$$

根据事件误差  $\varepsilon(k)$  的定义和引理2,如下关系成立:

$$\begin{cases} \| \varepsilon(k) \| \leq \| \hat{y}(k) + y(k) \| \leq 2Y(k); \\ 2Y(k) \| (\Psi A - \underline{LC}) \varphi + \underline{L} \| E_n - \\ ((\Psi A - \underline{LC}) \varphi + \underline{L}) \varepsilon(k) \geq 0; \\ 2Y(k) \| (\Psi A - \bar{LC}) \varphi + \bar{L} \| E_n + \\ ((\Psi A - \bar{LC}) \varphi + \bar{L}) \varepsilon(k) \geq 0. \end{cases} \quad (20)$$

引理3:如果矩阵  $\Psi A - \underline{LC}$  和  $\Psi A - \bar{LC}$  非负,  $\underline{Z}(0) \leq \underline{Z}(0) \leq \bar{Z}(0)$ , 无故障发生时 ( $f(k)=0$ ) 满足如下关系:

$$\underline{Z}(k) \leq \underline{Z}(k) \leq \bar{Z}(k), \underline{e}_\xi(k) \geq 0, \bar{e}_\xi(k) \geq 0, 0 \in [\underline{r}(k), \bar{r}(k)].$$

证明:根据式(18)、式(19)、式(20),如下关系成立:

$$\underline{e}_\xi(k) = \Psi Z(k) - \underline{\xi}(k) \geq 0. \quad (21)$$

$$\bar{e}_\xi(k) = \bar{\xi}(k) - \Psi Z(k) \geq 0. \quad (22)$$

误差系统变量定义如下:

$$\underline{e}(k) = Z(k) - \underline{Z}(k). \quad (23)$$

$$\bar{e}(k) = \bar{Z}(k) - Z(k). \quad (24)$$

将不对中故障检测区间观测器式(8)带入到式(23)和式(24)中,得出:

$$\begin{aligned} \underline{e}(k) &= Z(k) - \underline{Z}(k) + 2Y \| \varphi \| E_n = \\ \underline{e}_\xi(k) - \varphi \varepsilon(k) + 2Y \| \varphi \| E_n. \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \bar{e}(k) &= \hat{Z}(k) + 2Y(k) \| \varphi \| E_n - \\ Z(k) &= \bar{e}_\xi(k) + \varphi \varepsilon(k) + 2Y(k) \| \varphi \| E_n. \end{aligned} \quad (26)$$

根据引理2,可以得到:  $-\varphi \varepsilon(k) + 2Y \| \varphi \| E_n \geq 0, \varphi \varepsilon(k) + 2Y \| \varphi \| E_n \geq 0$ .

根据式(21)和式(22),如下不等式成立。

$$Z(k) - \underline{Z}(k) \geq 0. \quad (27)$$

$$\bar{Z}(k) - Z(k) \geq 0. \quad (28)$$

可得到如下系统:

$$\begin{cases} \ell(k+1) = \tilde{A} \ell(k) + \tilde{D} \hat{d}(k) + \tilde{E} \hat{\varepsilon}(k) + \tilde{F} f(k); \\ r(k) = \tilde{C} \ell(k) + \tilde{G} \hat{\varepsilon}(k); \\ y(k) = \tilde{C}_1 \ell(k). \end{cases} \quad (29)$$

设计不对中故障检测区间观测器主要思

想:

(1)  $\Psi A - \underline{LC}$  和  $\Psi A - \bar{LC}$  非负定且 Schur 稳定。

(2) 电磁干扰  $\hat{d}(k)$  对残差  $r(k)$  的影响为

$$\sup \frac{\| r(k) \|_\infty}{\| \hat{d}(k) \|_\infty} < \alpha. \quad (30)$$

其中,  $\hat{d}(k) \in l_\infty$ 。

(3) 不对中故障  $f(k)$  对残差  $r(k)$  的影响为

$$\frac{\| r(k) - \Pi f(k) \|}{\| f(k) \|_2} < \beta. \quad (31)$$

其中,  $0 \neq f(k) \in l_2, \Pi = \begin{bmatrix} \Pi_1 \\ \Pi_2 \end{bmatrix}$  为加权矩阵。

系统式(29)分为两个子系统,即:

当无故障时 ( $f(k)=0$ )

$$\begin{cases} \ell_d(k+1) = \tilde{A} \ell_d(k) + \tilde{D} \hat{d}(k) + \tilde{E} \hat{\varepsilon}(k); \\ r_d(k) = \tilde{C} \ell_d(k) + \tilde{G} \hat{\varepsilon}(k); \\ y_d(k) = \tilde{C}_1 \ell_d(k). \end{cases} \quad (32)$$

当无电磁干扰时 ( $\hat{d}(k)=0$ )

$$\begin{cases} \ell_f(k+1) = \tilde{A} \ell_f(k) + \tilde{E} \hat{\varepsilon}(k) + \tilde{F} f(k); \\ r_f(k) = \tilde{C} \ell_f(k) + \tilde{G} \hat{\varepsilon}(k); \\ y_f(k) = \tilde{C}_1 \ell_f(k). \end{cases} \quad (33)$$

### 2.3 不对中故障检测残差区间鲁棒性与故障敏感度分析

不对中故障检测时未知干扰鲁棒性条件如下:

定理1:对于给定的正定标量  $\alpha$ , 存在矩阵  $P > 0$  和  $H > 0$ ; 使得

$$[M_{i,j}]_{12 \times 12} < 0. \quad (34)$$

$$[N_{i,j}]_{9 \times 9} < 0. \quad (35)$$

如果不等式(34)、(35)成立, 则系统式(32)稳定, 满足式(30)给出的性能指标, 从而给出了未知干扰对残差区间影响的条件。

不平衡故障敏感度条件如下:

定理2:对于给定的正定标量  $\beta$ , 存在矩



阵  $\boldsymbol{Q} > 0, \boldsymbol{H} > 0$ ; 使得

$$[\boldsymbol{J}_{i,j}]_{12 \times 12} < 0. \tag{36}$$

如果不等式(36)成立,则系统式(33)稳定,满足式(31)给出的性能指标,从而给出了转子不对中故障对残差区间影响的条件。

二阶系统式(29)用于说明  $\boldsymbol{\Psi}\boldsymbol{A} - \bar{\boldsymbol{L}}\boldsymbol{C}$  和  $\boldsymbol{\Psi}\boldsymbol{A} - \bar{\boldsymbol{L}}\boldsymbol{C}$  为非负矩阵的条件。

定义:  $\boldsymbol{\Psi} = \begin{bmatrix} \psi_{11} & \psi_{12} \\ \psi_{21} & \psi_{22} \end{bmatrix}, \boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix},$

$$\underline{\boldsymbol{L}} = \begin{bmatrix} \underline{l}_1 \\ \underline{l}_2 \end{bmatrix}, \bar{\boldsymbol{L}} = \begin{bmatrix} \bar{l}_1 \\ \bar{l}_2 \end{bmatrix}, \boldsymbol{C} = [c_1 \quad c_2].$$

$$\boldsymbol{\Psi}\boldsymbol{A} - \bar{\boldsymbol{L}}\boldsymbol{C} =$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{11}a_{11} + \psi_{12}a_{21} - \bar{l}_1c_1 & \psi_{11}a_{12} + \psi_{12}a_{22} - \bar{l}_1c_2 \\ \psi_{21}a_{11} + \psi_{22}a_{21} - \bar{l}_2c_1 & \psi_{21}a_{12} + \psi_{22}a_{22} - \bar{l}_2c_2 \end{bmatrix}.$$

(37)

$$\boldsymbol{\Psi}\boldsymbol{A} - \bar{\boldsymbol{L}}\boldsymbol{C} =$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{11}a_{11} + \psi_{12}a_{21} - \bar{l}_1c_1 & \psi_{11}a_{12} + \psi_{12}a_{22} - \bar{l}_1c_2 \\ \psi_{21}a_{11} + \psi_{22}a_{21} - \bar{l}_2c_1 & \psi_{21}a_{12} + \psi_{22}a_{22} - \bar{l}_2c_2 \end{bmatrix}.$$

(38)

根据式(37)和式(38),得到的非负条件如下:

$$\boldsymbol{\psi}_{i,j}\boldsymbol{a}_{i,j} - \bar{\boldsymbol{l}}_i\hat{\boldsymbol{c}}_j \geq 0. \tag{39}$$

$$\boldsymbol{\psi}_{i,j}\boldsymbol{a}_{i,j} - \bar{\boldsymbol{l}}_i\hat{\boldsymbol{c}}_j \geq 0. \tag{40}$$

其中,  $i, j = 1, 2$ 。

根据式(39)、式(40),得到如下不等式:

$$\boldsymbol{O}_{i,j}\boldsymbol{a}_{i,j} - \boldsymbol{R}_i\boldsymbol{c}_j \geq 0. \tag{41}$$

$$\boldsymbol{K}_{i,j}\boldsymbol{a}_{i,j} - \boldsymbol{S}_i\boldsymbol{c}_j \geq 0. \tag{42}$$

其中,  $i, j = 1, 2; \boldsymbol{O}_{i,j} = \boldsymbol{O}^T; \boldsymbol{K}_{i,j} = \boldsymbol{K}^T; \boldsymbol{R}_i = \boldsymbol{R}^T; \boldsymbol{S}_i = \boldsymbol{S}^T$ 。

不等式(41)和式(42)为系统式(29)中  $\boldsymbol{\Psi}\boldsymbol{A} - \bar{\boldsymbol{L}}\boldsymbol{C}$  和  $\boldsymbol{\Psi}\boldsymbol{A} - \bar{\boldsymbol{L}}\boldsymbol{C}$  矩阵的非负条件。

转子系统不对中故障检测方法如下。

(1)通过求解以下优化问题,得到区间观测器的增益参数。

$$\min \quad \iota_1\alpha + \iota_2\beta - \iota_3\zeta + \iota_4\eta$$

s. t. 式(34) ~ (36), 式(41) ~ (42);

其中,  $\iota_1 > 0, \iota_2 > 0, \iota_3 > 0$  以及  $\iota_4 > 0$  为加权

因子。

(2)一旦残差区间不包含原点  $0 \notin [\underline{r}, \bar{r}]$ , 则发出不对中故障警报。

图2给出了基于事件触发区间观测器的转子不对中故障检测流程。

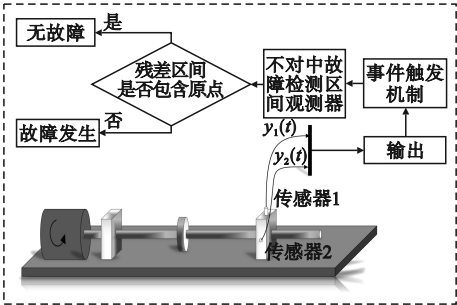


图2 转子不对中故障检测流程图

Fig. 2 The fault detection flow chart of rotor misalignment

### 3 实验验证

#### 3.1 实验背景

转子不对中实验台如图3所示。通过不断调节旋钮来增大实验台不对中程度模拟转子不对中故障,轴承为深沟球轴承,轴承型号为315,两个轴承座相距800 mm。振动响应加速度传感器型号为AIC60。

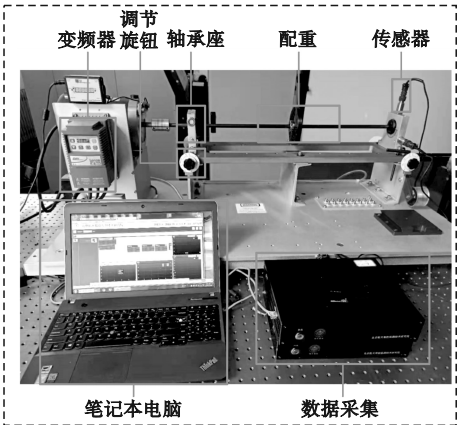


图3 转子不对中实验台

Fig. 3 The experimental setup of rotor misalignment

#### 3.2 实验结果与分析

利用转子不对中试验台以及振动响应加速度传感器,分别测量正常转子系统以及转子不对中系统  $x, y$  方向的振动响应加速度数据。

笔者提出的新型事件触发区间观测器(7)中采用正常转子系统测得的振动响应加速度数据,得到的残差区间如图4所示。新

型事件触发区间观测器式(7)中采用转子不对中系统测得的振动响应加速度数据,得到的残差区间如图5所示。

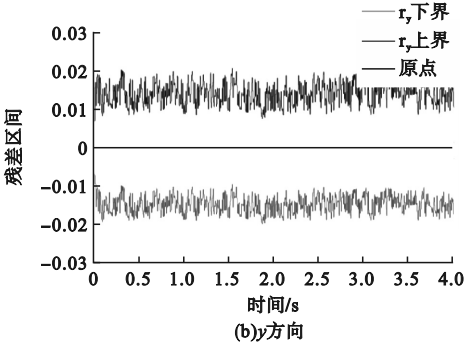
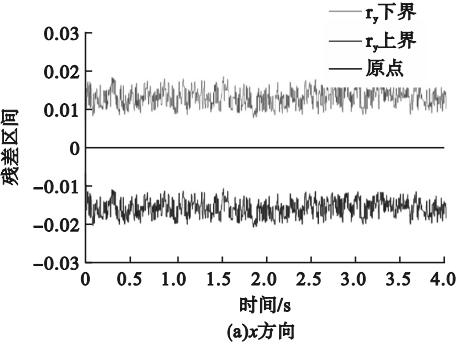


图4 正常转子系统得到的残差区间

Fig. 4 The residual interval obtained by normal rotor system

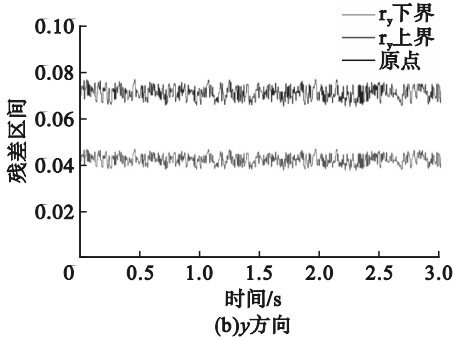
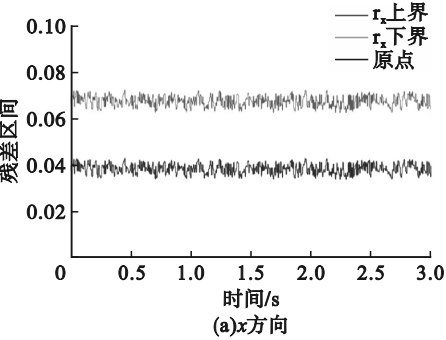


图5 转子不对中得到的残差区间

Fig. 5 The residual interval obtained by rotor misalignment

由图4和图5可知,无论是 $x$ 方向还是 $y$ 方向,新型事件触发区间器式(7)产生的残差故障检测结果在正常范围之内,此时无故障报警。调节实验台故障旋钮,出现转子不对中故障,则新型事件触发区间观测器产生的残差故障检测区间明显越过原点,此时超出故障检测范围,系统检测出故障,验证了基于事件触发观测器的转子系统不对中故障检测方法的有效性。转子不对中故障检测结果如表1所示。对比转子系统在故障检测中使用事件触发策略前后通信次数,结果表明,引入事件触发策略可以减少通信次数降低有线网络通信压力,验证了引入事件触发机制的有效性。

表1 转子不对中故障检测通信次数

Table 1 The fault detection communication times of rotor misalignment

故障情况	事件触发/次	正常通信/次
$x$ 方向无故障	189	400
$y$ 方向无故障	201	400
$x$ 方向有故障	129	300
$y$ 方向有故障	134	300

4 结 论

笔者提出的事件触发区间观测器,相比于Luenberger区间观测器拥有更广泛的应用范围;在保证检测效果的前提下,引入事件触发机制后,减少了通信次数,缓解了通信网络

压力。

参考文献

[1] 崔建国,李国庆,蒋丽英,等. 基于深度自编码网络的航空发动机故障诊断[J]. 振动、测试与诊断,2021,41(1):85-89.  
(CUI Jianguo, LI Guoqing, JIANG Liying, et al. Aero-engine fault diagnosis based on deep self-coding network [J]. Journal of vibration, measurement & diagnosis, 2021, 41 (1): 85 - 89. )

[2] 余晓霞,汤宝平,魏静,等. 强背景噪声条件下自适应图卷积神经网络的航空发动机附件机匣故障诊断方法[J]. 仪器仪表学报,2021,41(8):78-86.  
(YU Xiaoxia, TANG Baoping, WEI Jing, et al. Fault diagnosis for aero-engine accessory gearbox by adaptive graph convolutional networks under intense background noise conditions [J]. Chinese journal of scientific instrument, 2021, 41 (8): 78 - 86. )

[3] 朱敏,许爱强,李睿峰,等. 基于隶属度和LMK-ELM的航空电子部件诊断方法[J]. 航空学报,2019,40(12):207-219.  
(ZHU Min. XU Aiqiang, LI Ruifeng, et al. Diagnosis method for avionics based on membership and LMK-ELM [J]. Acta aeronautica et sinica, 2019, 40 (12): 207 - 219. )

[4] 张宏献,李学军,蒋玲莉,等. 航空发动机双转子系统不对中研究进展[J]. 航空学报,2019,40(6):42-53.  
(ZHANG Hongxian, LI Xuejun, JIANG Lingli, et al. A review of misalignment of aero-engine rotor system [J]. Acta aeronautica et sinica, 2019, 40 (6): 42 - 53. )

[5] 杨光红,张志慧. 基于区间观测器的动态系统诊断技术综述[J]. 控制与决策,2018,33(5):769-781.  
(YANG Guanghong, ZHANG Zhihui. Review of interval observer based fault diagnosis techniques for dynamic systems [J]. Control and decision, 2018, 33 (5): 769 - 781. )

[6] LIAO H, LI H. Distributed voltage equalization design for super capacitors using state observer [J]. IEEE transactions on industry and applications, 2019, 55 (1): 620 - 630.

[7] HOU M X, SHI H T. Stator-winding incipient shorted-turn fault detection for motor system in motorized spindle using modified interval

observers [J]. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 2020, 70: 1 - 16.

[8] SHI H T, HOU M X. leader-following consensus of first-order multi-agent systems with dynamic hybrid quantizer [J]. International journal of control, automation and systems, 2020, 18 (11): 2765 - 2773.

[9] 石怀涛,侯马骁,佟圣皓. 不稳定子系统组成的离散时间切换系统区间观测器设计[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2022, 38(1):172-178.  
(SHI Huaitao, HOU Maxiao, TONG Shenghao. Interval observer design for switched discrete-time systems composed of unstable subsystems [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2022, 38 (1): 172 - 178. )

[10] CHIBANI A, CHADLI M, SHI P. Fuzzy fault detection filter design for T-S fuzzy systems in the finite-frequency domain [J]. IEEE transactions on fuzzy systems, 2017, 25:1051-1061.

[11] MAZENC F, BERNARD O. Asymptotically stable interval observers for planar systems with complex poles [J]. IEEE transactions on automatic control, 2010, 55 (2): 523 - 527.

[12] CHEBOTAREV S, EFIMOV D, RAISSI T, et al. Interval observers for continuous-time LPV systems with performance [J]. Automatica, 2015, 58:82-89.

[13] ZAMMALI C. Interval observers based fault detection for switched systems with performances [J]. European control conference, 2020, 63 (2): 140 - 150.

[14] SU Q Y, FAN Z X, LU T, et al. Fault detection for switched systems with all modes unstable based on interval observer [J]. Information sciences, 2020, 517:167-182.

[15] ZHANG Z H, YANG G H. Distributed fault detection and isolation for multi-agent systems: an interval observer approach [J]. IEEE transactions on systems, man and cybernetics: systems, 2018, 50 (4): 560 - 569.

[16] 王佳伟,沈毅,王振华. 基于未知输入观测器的线性切换系统故障检测[J]. 控制与决策, 2017, 32 (11): 1973 - 1979.  
(WANG Jiawei, SHEN Yi, WANG Zhenhua. Fault detection for linear switched systems based on unknown input observers [J]. Control and decision, 2017, 32 (11): 1973 - 1979. )

(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)